

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Хамзина А.Р., Квятковская А.С. Очистка электролита от шлама после электрохимической обработки титанового сплава BT-6 // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 48–54. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.3.05

Please cite this article in English as:

Khamzina A.R., Kvyatkovskaya A.S. Cleaning the electrolyte from sludge after the electrochemical treatment of titanium alloy BT-6. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2023, vol. 25, no. 3, pp. 48-54. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.3.05

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 25, № 3, 2023**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2023.3.05

УДК 669.018+669.3/6

**А.Р. Хамзина, А.С. Квятковская**

Уфимский университет науки и технологии, Уфа, Российская Федерация

**ОЧИСТКА ЭЛЕКТРОЛИТА ОТ ШЛАМА ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА BT-6**

В основе процесса размерной электрохимической обработки (ЭХО) лежит принцип локального анодного растворения металла при высокой плотности тока в проточном электролите. Весь снимаемый с детали материал переходит в электролит, образуя в результате электрохимических реакций нерастворимые гидраты окислов обрабатываемого металла, так называемый шлам. При этом образуется многокомпонентная суспензия – мелкодиспергированные частицы шлама аморфного хлопьевидного характера. Зашламление электролита снижает качество обрабатываемой поверхности, точность электрохимического формообразования, уменьшает производительность ЭХО, увеличивает вероятность коротких замыканий. В связи с этим задача очистки электролита высокопроизводительным, эффективным и экономичным способом является актуальной.

Исследование очистки электролита 12 % NaNO<sub>3</sub> + 5 % NaCl после ЭХО титанового сплава BT6 методом флотации проводилось с использованием флотирующих реагентов различного состава в том числе и с использованием катионного флокулянта Praestol 851BC. Выявлено, что наилучший флотирующий эффект имеет место при введении олеиновой кислоты. Установлена эффективная концентрация флотореагента (30 % олеиновой кислоты), при котором шлам флотируется за 1 мин.

В производственных условиях изучалось влияние флотирующих реагентов на электрофлотацию титанового шлама. Установлено повышение эффективности на процесс флотации применения способа очистки электролита – электрофлотации. Рассмотрены результаты исследований влияния природы флотореагента на электрофлотацию. Выявлено, что при электрофлотационном способе очистки электролита без введения флотирующих реагентов титановый шлам поднимается на поверхность раздела за 10–12 мин, но при этом пузырьки отделяются от шлама за такое же время, и шлам опускается на дно электролизера.

**Ключевые слова:** флотация, электролит, электрофлотация, флотирующий реагент, титановый шлам, осадок, электрохимическая обработка, поверхностно-активное вещество, катионный флокулянт, флотирующая способность.

A.R. Khamzina, A.S. Kvyatkovskaya

Ufa Science and Technology University, Ufa, Russian Federation

## CLEANING THE ELECTROLYTE FROM SLUDGE AFTER THE ELECTROCHEMICAL TREATMENT OF TITANIUM ALLOY BT-6

The principle of local anodic dissolution of metal at high current density in the flowing electrolyte is the basis of the process of dimensional electrochemical treatment (ECT). All the material removed from the part goes into the electrolyte, forming as a result of electrochemical reactions insoluble oxide hydrates of the processed metal, is called sludge. This creates a multicomponent suspension – finely dispersed particles of sludge, amorphous flake-like nature. The clogging of electrolyte reduces the quality of the treated surface, the accuracy of electrochemical shaping, reduces the productivity of electrochemical treatment, increases the probability of short circuits. In this regard, the task of cleaning the electrolyte by high-performance, efficient and economical method is relevant.

Research of the purification of 12 %  $\text{NaNO}_3$  + 5 %  $\text{NaCl}$  electrolyte after ECHO of titanium alloy BT6 by flotation was carried out with the use of flotation reagents of various compositions, including the use of the cationic flocculant Praestol 851BC. It is revealed that the best flotation effect takes place at introduction of oleic acid. The effective concentration of flotation agent (30% oleic acid) at which the sludge is floated for 1 minute is established.

Under production conditions the influence of flotation reagents on electric flotation of titanium sludge was studied. The increase of efficiency of flotation process by application of electrolyte purification method – electroflotation is established. The results of studies of the influence of the nature of flotation agent on electroflotation are considered. It is revealed that at the electroflotation method of electrolyte purification without introduction of flotation reagents, the titanium sludge rises to the surface of the interface in 10–12 minutes, but the bubbles are separated from the sludge, in the same time the sludge sinks to the bottom of the electrolyzer.

**Keywords:** flotation, electrolyte, electroflotation, flotation reagent, titanium sludge, sludge, electrochemical treatment, surfactant, cationic flocculant, flotation capacity.

### Введение

Технологические показатели электрохимической обработки (ЭХО) в значительной степени определяются чистотой непрерывно нагнетаемого в межэлектродный зазор (МЭЗ) электролита [1–3]. В процессе работы электрохимического станка в электролите накапливается значительное количество продуктов анодного растворения – шламов, состоящих из окислов металлических компонентов обрабатываемой детали и других примесей [4; 5].

Очистка электролита в электрохимических станках усложняется малыми размерами частиц шлама, например, частицы при ЭХО жаропрочных сплавов имеют размер 2–5 мкм, и еще меньший размер частиц при ЭХО титановых сплавов. Требования к чистоте электролита возрастают при уменьшении величины МЭЗ: так, ЭХО на импульсном токе при минимальном МЭЗ  $s \leq 0,02$  мм возможна лишь при зашламленности электролита не более 0,5–1 г/л. В связи с этим очистка электролита эффективным и экономичным способом является актуальной задачей [6–9].

Гидроокиси металлов, образующихся в процессе ЭХО всевозможных металлов и сплавов, представляют собой мелкодисперсные коллоидные системы, несущие на себе электрический заряд. В присутствии электролитов взвешенные коллоидные частицы лишаются устойчивости, слипаются друг с другом и в виде агрегатов выпадают на дно. Этот процесс происходит во времени. Образующаяся сложная коллоидная система имеет очень большую дисперсность и сильно развитую удельную поверхность, обладающую высокой способностью удерживать влагу и соли [10–13]. Как показали многочисленные изыскания, проводимые раз-

личными исследованиями, механические устройства (отстойники, центрифуги, фильтры и другое) не позволяют полностью очистить электролит от шлама после ЭХО деталей из титанового сплава. С помощью простой процедуры промывки исходных шламов также очень трудно добиться отмывки шлама от солей электролита. Использование огромных количеств воды на промывку не дает желаемого результата. Даже при 60-кратном разбавлении шлама в воде и последующей фильтрации в шламе остается около 1 % соли [14; 15].

На сегодняшний день флотация является одним из наиболее эффективных способов очистки [16–18]. В связи с этим перспективной задачей оказывается повышение степени извлечения шлама после ЭХО деталей из титановых сплавов, основываясь на современных представлениях о флотационных реагентах, при снижении эксплуатационных затрат. Пути решения данной задачи можно получить в результате исследований флотационных методов.

Элементарный акт флотации заключается в следующем: при сближении поднимающегося в воде пузырька воздуха с твердой гидрофобной частицей разделяющая их прослойка воды при некоторой критической толщине прорывается и происходит слипание пузырька с частицей. Затем комплекс «пузырек – частица» поднимается на поверхность воды, где пузырьки собираются, и возникает пенный слой с более высокой концентрацией частиц, чем в исходной воде [19–21].

Анализ современных исследований по теории взаимодействия флотационных реагентов позволяет выделить сформировавшееся за последнее время научное направление, которое в общем виде можно охарактеризовать как разработку различных

физических, физико-химических и химических приемов, повышающих качество флотационных реагентов путем придания им новых свойств и изменения поведения в элементарном акте флотации. Из наиболее перспективных в промышленном применении следует отметить электрохимическую обработку реагентов, применение стимуляторов – добавок поверхностно-активных веществ (ПАВ) [22].

### Экспериментальная часть

Отработанный электролит состава 12 %  $\text{NaNO}_3$  + 5 %  $\text{NaCl}$  для исследований отбирался из бака электрохимического станка после 8 ч электрохимической обработки лопаток, изготовленных из титанового сплава ВТ6. Шлам, образующийся в процессе ЭХО, представляет собой студенистую массу нерастворимых в воде гидроокисей обрабатываемого материала. Частицы шлама мелкодиспергированные, аморфного, хлопьевидного характера.

На величину смачиваемости поверхности взвешенных частиц влияют адсорбционные явления и присутствие примесей ПАВ. Поверхностно-активные вещества – реагенты-собиратели, адсорбируясь на частицах, понижают их смачиваемость, т.е. делают их гидрофобными. В качестве реагентов-собирателей используют масла, жирные кислоты и их соли, амины и другие вещества [23–25].

Флотирующие реагенты, применяемые для исследования очистки электролита методом флотации, представлены в таблице.

#### Флотирующие реагенты

№ флотирующего реагента	Составы флотирующих реагентов
1	6 % ПАВ (анионные+амфотерные ПАВ)
2	8 % олеиновая кислота
3	13 % олеиновая кислота
4	30 % олеиновая кислота
5	6 % талловое масло
6	13 % талловое масло
7	20 % талловое масло

На рис. 1 представлена зависимость объема флотационного шлама в зависимости от состава реагента. Время флотации при добавлении каждого реагента составляло 24 ч.

Из данных рис. 1 видно, что при добавлении 6 % ПАВ в отработанный электролит флотации шлама не происходит. Рассмотрим влияние на процесс флотации олеиновой кислоты. При добавлении флотирующих реагентов – 8 и 13 % олеиновой кислоты – объем флотационного шлама составил 0,6 и 0,8 мл на 100 мл электролита соответственно. На дне емкости с электролитом наблюдался

остаток шлама. Выявлено, что при увеличении концентрации олеиновой кислоты до 30 % титановый шлам полностью поднялся на поверхность.

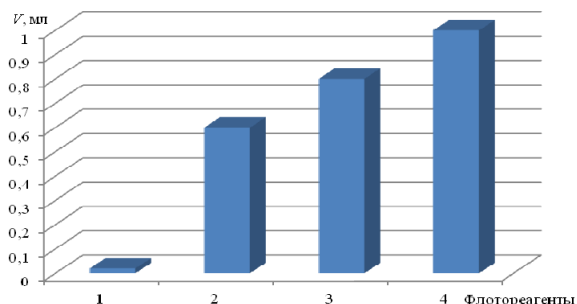


Рис. 1. Зависимость объема флотационного шлама от состава флотирующих реагентов на основе олеиновой кислоты

Рассмотрим время, необходимое для флотации титанового шлама из отработанного электролита при введении флотирующих реагентов на основе олеиновой кислоты.

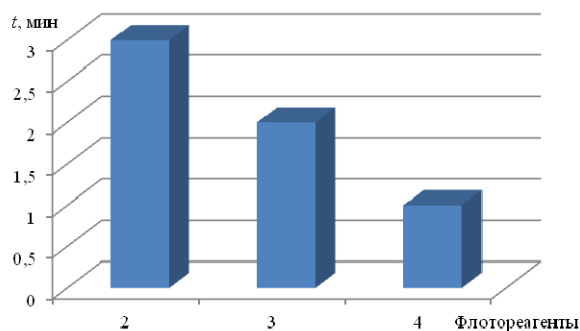


Рис. 2. Время флотации шлама при введении флотирующих реагентов на основе олеиновой кислоты

Как видно из рис. 2, при добавлении в электролит 8 % олеиновой кислоты время флотации составило 3 мин, при увеличении концентрации флотирующего реагента с 13 до 30 % время флотации составило от 2 до 1 мин. Таким образом, введение в электролит 30 % олеиновой кислоты способствует полному подъему шлама на поверхность раздела за меньшее время (1 мин).

Рассмотрим влияние на процесс флотации другого флотирующего реагента – таллового (сульфатного) масла (рис. 3).

На рис. 3 приведены результаты исследования флотации титанового шлама при введении в электролит таллового масла различной концентрации. Как видно из данных рис. 3, при минимальной концентрации флотореагента 6 % таллового масла – объем флотационного шлама вместе с талловым маслом составил 0,8 мл. При увеличении концентрации объем флотирующего шлама увели-

чивается. Установлено, что титановый шлам из электролита полностью не удаляется, наблюдаются остатки шлама.

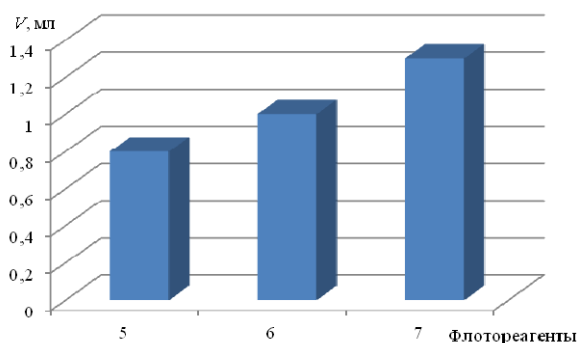


Рис. 3. Зависимость объема флотационного шлама от состава флотирующих реагентов на основе таллового масла

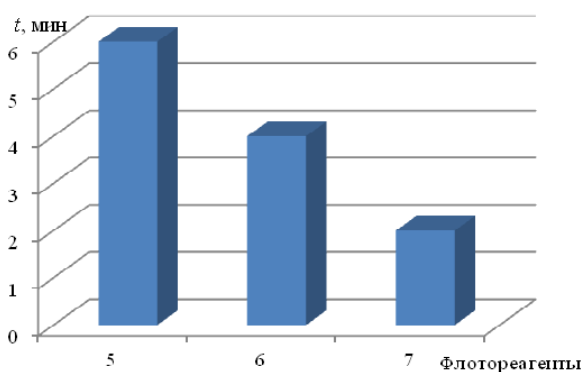


Рис. 4. Время флотации шлама при введении флотирующих реагентов на основе таллового масла

При добавлении таллового масла с наименьшей концентрацией (6 %), флотационный шлам поднимается в течение 6 мин, при введении в электролит более высокой концентрации флотирующего реагента (13 %) шлам поднимается за 4 мин, а при концентрации 20 % – за 2 мин (рис. 4). Таким образом, исследования показали, что время флотации при добавлении 20 % таллового масла, по сравнению с олеиновой кислотой, в два раза больше.

Исследования на флотирующую способность титанового шлама с использованием катионного флокулянта Praestol 851BC показали, что данный флотореагент осаждает титановый шлам, образуется клеобразная масса. Титановый шлам полностью связывается и образует осадок, реагент не флотирует.

В производственных условиях проводились исследования очистки электролита более эффективным способом – электрофлотация. Изучалось влияние флотирующих реагентов на электрофлотацию титанового шлама.

Рассмотрим результаты исследований влияния природы флотореагента на электрофлотацию.

На рис. 5 представлена зависимость объема флотационного шлама от времени электрофлотации без введения реагентов.

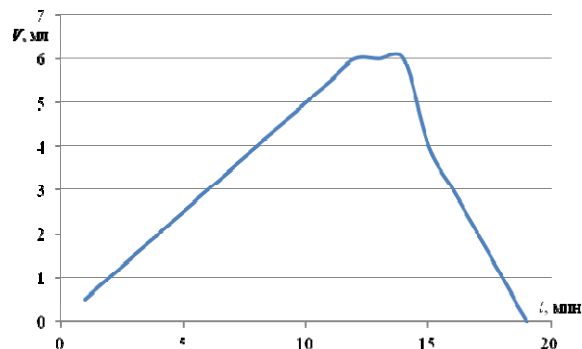


Рис. 5. Зависимость объема флотационного шлама от времени электрофлотации без введения флотирующего реагента

Электрофлотация способствует подъему шлама на поверхность за 11 мин. Шлам на границе раздела фаз находится в течение 2–3 мин, но далее, вследствие отделения пузырьков от частичек шлама, шлам частично опускается и на дне оказывается через 6 мин. Таким образом, электрофлотация без флотирующего реагента является крайне неустойчивой, титановый шлам под естественным весом опадает на дно ванны, что неприемлемо в производстве.

На рис. 6 представлена зависимость объема флотирующего шлама после электрофлотации при введении олеиновой кислоты.

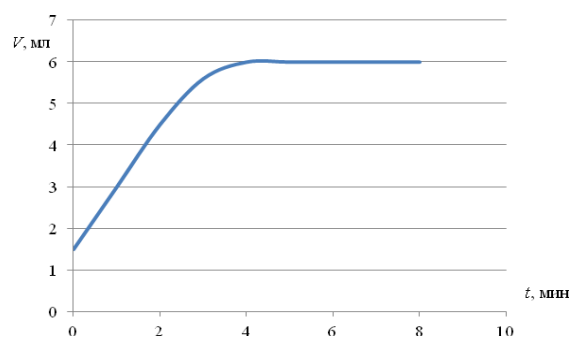


Рис. 6. Зависимость объема флотационного шлама от времени после электрофлотации при введении олеиновой кислоты

Выявлено, что время полной электрофлотации составляет 4 мин, что  $\approx$  в 3 раза быстрее по сравнению с электрофлотацией без реагента. Флотируемый шлам находился на границе раздела фаз в течение 2 ч, при этом осадка не наблюдалось. Таким образом, электрофлотация с применением олеиновой кислоты способствует подъему всего шлама из электролита.

На рис. 7 представлен флотационный шлам после электрофлотации с применением олеиновой кислоты.

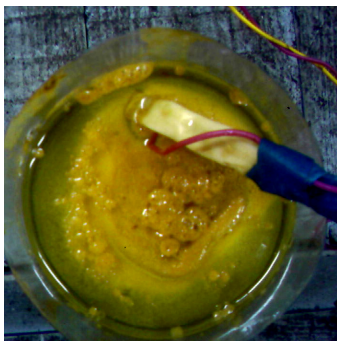


Рис. 7. Электрофлотация электролита с применением олеиновой кислоты

Исследования электрофлотации при введении таллового масла (рис. 8) показали, что время электрофлотации составляет 7 мин. На границе раздела фаз шлам находится в течение 1–1,5 ч, затем частично оседает.

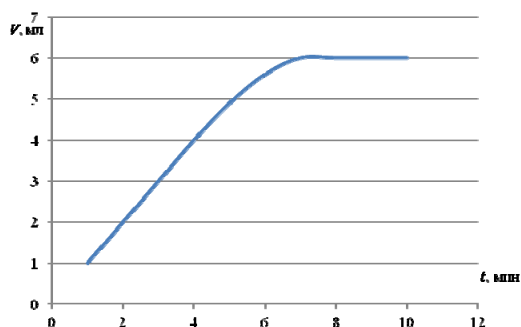


Рис. 8. Зависимость объема флотационного шлама от времени при введении таллового масла в результате электрофлотации

На рис. 9 представлена электрофлотация титанового шлама при введении флотирующего реагента таллового масла. Исследования электрофлотации с применением таллового масла выявили выделение токсичного газа, что затрудняет процесс эксплуатации данного флотореагента.



Рис. 9. Электрофлотация титанового шлама с применением таллового масла

## Заключение

Таким образом, в результате исследований выявлено:

1. Эффективным и экономичным способом очистки электролита после электрохимической обработки лопаток из сплава ВТ6 от титанового шлама является флотация. При введении флотирующих реагентов для флотации, представленных в таблице, выявлен наилучший флотирующий эффект при добавлении олеиновой кислоты. Установлена эффективная концентрация флотирующего реагента (30 % олеиновой кислоты), при котором шлам флотируется за 1 мин, но с течением времени часть шлама оседает на дне бака.

2. Установлено повышение эффективности на процесс флотации применением способа очистки электролита – электрофлотации. При электрофлотации электролита без флотореагентов титановый шлам поднимается на поверхность раздела за 10–12 мин, но при этом пузырьки отделяются от шлама, и за такое же время шлам опускается на дно электролизера. В отличие от электрофлотации без реагента, при введении флотореагентов, состоящих из таллового масла, олеиновой кислоты, электрофлотация шлама составляет от 1 до 6 мин.

Очистка электролита после ЭХО лопаток, изготовленных из сплава ВТ6, наиболее эффективна с применением метода электрофлотации с добавлением флотирующего реагента – 30 % олеиновой кислоты.

## Библиографический список

1. Амирханова Н.А., Зайцев А.Н., Зарипов Р.А. Электрохимическая размерная обработка материалов в машиностроении: учеб. пособие. – Уфа: УГАТУ, 2004. – 258 с.
2. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. учеб. пособие: в 2 т. Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента / Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожалова [и др.]; под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высш. Шк., 1983. – 247 с.
3. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А., Цирлина Г.А. Электрохимия. – 2-е изд., и перераб. – М.: Химия, КолосС, 2006. – 672 с.
4. Салахутдинов Р.М., Зайцев А.Н., Суглоб А.В. Проектирование системы очистки и регенерации электролита и обеспечение экологической чистоты электрохимических станков: учеб. пособие. – Уфа: УГАТУ, 2011. – 90 с.
5. Попилов Д.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: справочник – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.
6. Руководство НИАТ по проектированию и эксплуатации систем приготовления, хранения, подачи, очистки и регенерации электролита электрохимических станков / НИАТ. – М., 1978.

7. Оборудование для размерной электрохимической обработки деталей машин / В.Ф. Седыкин, Л.Б. Дмитриев, Н.И. Иванов [и др.]; под ред. Ф.В. Седыкина. – М.: Машиностроение, 1980. – 227 с.

8. Утилизация шламов после электрохимической обработки титановых и коррозионно-стойких сплавов / Н.А. Амирханова, В.В. Саяпова, Е.Ю. Черняева, Е.А. Смирнова, А.А. Оратовская // Экология и промышленность России. – 2008 – № 4 – С. 8–9.

9. Штриплинг Л.О., Туренко Ф.П. Основы очистки сточных вод и переработки твердых отходов: учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. – 192 с.

10. Саяпова В.В., Амирханова Н.А., Черняева Е.Ю. Очистка электролита от шлама в процессе ЭХРО флотационным методом // Международная научно-практическая конференция «Приоритет России XXI века: от биосферы и техносферы к ноосфере». – Пенза: РИО ПГСХА, 2004. – С. 126–128.

11. Реагентная очистка сточных вод и утилизация отработанных растворов и осадков гальванических производств: учеб. пособие / Ю.П. Перельгин, О.В. Зорькина, И.В. Рашевская, С.Н. Николаева. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2013. – 80 с.

12. Томская Е.С. Интенсификация процесса флотации кварца из железистых кварцитов с использованием электрохимической обработки реагентов. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 5. – С. 73–78.

13. Теория и технология флотации руд / О.С. Богданов, И.И. Максимов, А.К. Поднек, Н.А. Янис. – М.: Недра, 1990.

14. Родина Т.А. Флотационные реагенты: учеб. пособие для самостоятельной работы по органической химии. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2015. – 36 с.

15. Шафеев Р.Ш. Применение электрохимических методов в процессе флотации. – М.: Цветметинформация, 1971. – 68 с.

16. Золотов А.В., Лисовский В.А. Флотация и её применение для очистки сточных вод // Science Time. – 2016. – № 2 (26) – С. 266–273.

17. Diya'uddeen B.H., Ashri Wan Daud W.M., Abdul Aziz A.R. Treatment technologies for petroleum refinery effluents: A review // Process Safety and Environmental Protection. – 2011. – Vol. 89, iss. 2. – P. 95–105.

18. Основные способы очистки нефтесодержащих производственных сточных вод / А.В. Золотов, В.А. Лисовский, И.С. Багреева, Е.В. Слепова // Science Time. – 2016. – № 8 (32) – С. 42–54.

19. Чантурия В.А., Лунин В.Д. Электрохимические методы интенсификации процесса флотации. – М.: Наука, 1983. – 145 с.

20. Катионные реагенты / О.С. Богданов, А.М. Гольман [и др.] // Физико-химические основы теории флотации. – М.: Наука, 1983. – С. 167–181.

21. Шнырев А.П. Флотационная очистка электролитов и СОЖ после механической обработки деталей машин // Наука и техника Казахстана. – 2008. – № 2 – С. 77–80.

22. Чантурия Е.Л., Чантурия В.А., Журавлева Е.С. Перспективы использования электрохимической технологии водоподготовки при флотационном обогащении

медно-цинковых руд // Цветные металлы. – 2016. – № 1. – С. 13–19.

23. Авдохин В.М., Губин С.Л. Обратная катионная флотация тонкодисперсных железорудных концентратов // ГИАБ. – 2006. – № 6. – С. 324–331.

24. Анализ эффективности реагентных методов удаления ионов тяжелых металлов из сточных вод / Н.Н. Красногорская [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2004. – № 3. – С. 21–22.

25. Очистка сточных вод: пер. с англ. / М. Хенце, П. Армозс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван. – М.: Мир, 2006. – 480 с.

## References

1. Amirkhanova N.A., Zaitsev A.N., Zaripov R.A. Elektrokhimicheskaja razmeraia obrabotka materialov v mashinostroenii: uchebnyy posobie [Electrochemical dimensional processing of materials in mechanical engineering: textbook]. Ufa: UGATU, 2004, 258 p.

2. Artamonov B.A., Volkov Iu.S., Drozhalova V.I. et al. Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov. uchebnoe posobie: v 2 tomah. Vol. 1. Obrabotka materialov s primeneniem instrumenta [Electrophysical and electrochemical methods of materials processing. textbook: in 2 vol. Vol. 1. Processing of materials with the use of tools]. Ed. V.P. Smolentseva. Moscow: Vysshaya Shkola, 1983, 247 p.

3. Damaskin B.B., Petrii O.A., Tsirlina G.A. Elektrokhimiia [Electrochemistry]. 2nd. Moscow: Khimiia, KolosS, 2006, 672 p.

4. Salakhutdinov R.M., Zaitsev A.N., Suglob A.V. Proektirovanie sistemy ochistki i regeneratsii elektrolita i obespechenie ekologicheskoi chistoty elektro-khimicheskikh stankov: uchebnoe posobie [Designing of Electrolyte Cleaning and Regeneration System and Ensuring Environmental Cleanliness of Electro-Chemical Machines: textbook]. Ufa: UGATU, 2011, 90 p.

5. Popilov D.Ia. Elektrofizicheskaia i elektrokhimicheskaja obrabotka materialov: spravochnik [Electrophysical and electrochemical processing of materials: handbook]. 2nd. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 400 p.

6. Rukovodstvo NIAT po proektirovaniu i ekspluatatsii sistem prigotovleniia, khraneniia, podachi, ochistki i regeneratsii elektrolita elektrokhimicheskikh stankov [NIAT guidelines for the design and operation of electrolyte preparation, storage, feeding, cleaning and regeneration systems for electrochemical machines]. NIAT. Moscow, 1978.

7. Sedykin V.F., Dmitriev L.B., Ivanov N.I. et al. Ed. F.V. Sedykina Oborudovanie dlia razmernoi elektrokhimicheskoi obrabotki detalei mashin [Equipment for dimensional electrochemical machining of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 227 p.

8. Amirkhanova N.A., Saiapova V.V., Cherniaeva E.Iu., Smirnova E.A., Oratovskaia A.A. Utilizatsiia shlamov posle elektrokhimicheskoi obrabotki titanovykh i korroziionno-stoikikh splavov [Sludge utilization after electrochemical treatment of titanium and corrosion-resistant alloys]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2008, no. 4, pp. 8–9.

9. Shtripling L.O., Turenko F.P. Osnovy ochistki stochnykh vod i pererabotki tverdykh otkhodov: uchebnoe posobie [Fundamentals of wastewater treatment and solid waste processing: textbook]. Omsk: Izdatelstvo OmGTU, 2005, 192 p.

10. Saiapova V.V., Amirkhanova N.A., Cherniava E.Iu. Oчistka elektrolita ot shlama v protsesse EKhRO flotatsionnym metodom [Purification of electrolyte from sludge in the ECHRO process by flotation method]. *Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaia konferentsiia «Prioritet Rossii XXI veka: ot biosfery i tekhnosfery k noosfere»*. Penza: RIO PGSKhA, 2004, pp. 126–128.
11. Pereygin Iu.P., Zor'kina O.V., Rashevskaya I.V., Nikolaeva S.N. Reagentnaia oчistka stochnykh vod i utilizatsiia otrabotannykh rastvorov i osadkov gal'vanicheskikh proizvodstv: uchebnoe posobie [Reagent treatment of wastewater and utilization of spent solutions and sludge from galvanic works: textbook]. Penza: Izdatelstvo PGU, 2013, 80 p.
12. Tomskaia E.S. Intensifikatsiia protsessa flotatsii kvartsa iz zhelezistykh kvartsitov s ispol'zovaniem elektrokhimicheskoi obrabotki reagentov [Intensification of quartz flotation process from ferruginous quartzites using electrochemical treatment of reagents]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2014, no. 5, pp. 73–78.
13. Bogdanov O.S., Maksimov I.I., Podnek A.K., Ianis N.A. Teoriia i tekhnologiya flotatsii rud [Theory and technology of ore flotation]. Moscow: Nedra, 1990.
14. Rodina T.A. Flotatsionnye reagenty: ucheb. posobie dlia samostoiatel'noi raboty po organicheskoi khimii [Flotation reagents: textbook for independent work in organic chemistry]. Blagoveshchensk: Izdatelstvo AmGU, 2015, 36 p.
15. Shafeev R.Sh. Primenenie elektrokhimicheskikh metodov v protsesse flotatsii [Application of electrochemical methods in the flotation process]. Moscow: Tsvetmet-informatsiia, 1971, 68 p.
16. Zolotov A.V., Lisovskii V.A. Flotatsiia i ee primeneniye dlia oчistki stochnykh vod [Flotation and its application to wastewater treatment]. *Science Time*, 2016, no. 2 (26), pp. 266–273.
17. Diya'uddeen B.H., Ashri Wan Daud W.M., Abdul Aziz A.R. Treatment technologies for petroleum refinery effluents: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 2011, vol. 89, iss. 2, pp. 95–105.
18. Zolotov A.V., Lisovskii V.A., Bagreeva I.S., Slepova E.V. Osnovnye sposoby oчistki neftesoderzhashchikh proizvodstvennykh stochnykh vod [Main methods of oily industrial wastewater treatment]. *Science Time*, 2016, no. 8 (32), pp. 42–54.
19. Chanturiia V.A., Lunin V.D. Elektrokhimicheskie metody intensivatsii protsessa flotatsii [Electrochemical methods of flotation process intensification]. Moscow: Nauka, 1983, 145 p.
20. Bogdanov O.S., Gol'man A.M. et al. Kationnye reagenty [Physico-chemical bases of flotation theory]. *Fiziko-khimicheskie osnovy teorii flotatsii*. Moscow: Nauka, 1983, pp. 167–181.
21. Shnyrev A.P. Flotatsionnaia oчistka elektrolitov i SOZh posle mekhanicheskoi obrabotki detalei mashin [Flotation cleaning of electrolytes and coolants after mechanical machining of machine parts]. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*, 2008, no. 2, pp. 77–80.
22. Chanturiia E.L., Chanturiia V.A., Zhuravleva E.S. Perspektivy ispol'zovaniia elektrokhimicheskoi tekhnologii vodopodgotovki pri flotatsionnom obogashchenii medno-tsinkovykh rud [Prospects of using electrochemical water treatment technology in flotation enrichment of copper-zinc ores]. *Tsvetnye metally*, 2016, no. 1, pp. 13–19.
23. Avdokhin V.M., Gubin S.L. Obratnaia kation-naia flotatsiia tonkodispersnykh zhelezorudnykh kontsentrats [Reverse cationic flotation of fine iron ore concentrates]. *GIAB*, 2006, no. 6, pp. 324–331.
24. Krasnogorskaia N.N. et al. Analiz effektivnosti reagentnykh metodov udaleniia ionov tiazhelykh metallov iz stochnykh vod [Analysis of efficiency of reagent methods of heavy metal ions removal from waste]. *Bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti*, 2004, no. 3, pp. 21–22.
25. Khentse M., Armoes P., Lia-Kur-Iansen I., Avan E. Oчistka stochnykh vod [Wastewater treatment]. Moscow: Mir, 2006, 480 p.

Поступила: 18.04.2023

Одобрена: 23.06.2023

Принята к публикации: 01.09.2023

#### Об авторах

**Хамзина Альбина Расиховна** (Уфа, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения УУНИТ (Российская Федерация, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, корп. 8, e-mail: FATSTM@yandex.ru).

**Квятковская Адель Станиславовна** (Уфа, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой зеленой химии и ресурсосберегающей технологии УУНИТ. (Российская Федерация, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, корп. 9, e-mail: kvyatkovskay@mail.ru).

#### About the authors

**Albina R. Khamzina** (Ufa, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Mechanical Engineering Department of Ufa Science and Technology University (12, K. Marx str., Russian Federation, 450008, Ufa, build. 8, e-mail: FATSTM@yandex.ru).

**Adel S. Kvyatkovskaya** (Ufa, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, head of the Department of Green Chemistry and Resource-Saving Technology of Ufa Science and Technology University (12, K. Marx str., Russian Federation, 450008, Ufa, build. 9, e-mail: kvyatkovskay@mail.ru).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценен.